

REV PORT PNEUMOL 2004; X (1, SUPL 1): S 91-S 103

XIX CONGRESSO DE PNEUMOLOGIA

Bioterrorismo. Etiopatogenia da agressão por radiações

MARIA FILOMENA BOTELHO

Instituto de Biofísica e Biomatemática, IBILI, Faculdade de Medicina, Coimbra

RESUMO

Depois de se abordarem as diversas possibilidades de terrorismo nuclear e de se referirem as unidades de medida da radiação ionizante, fazemos uma descrição detalhada dos efeitos biológico da radiação. Para além de se referirem as acções directas e indirectas das radiações em meios biológicos, falamos em especial dos efeitos celulares, da radiosensibilidade das células e tecidos. Os efeitos biológicos são tratados em pormenor, considerando as diversas síndromas celulares agudos, tais como os efeitos no sistema hematopoiético, efeitos no sistema gastrointestinal, efeitos combinados das agressões, os efeitos somáticos tardios ou os efeitos genéticos.

REV POR PNEUMOL 2004; X (SUPL 1): 91-103

Palavras-chave: Terrorismo nuclear, radiações ionizantes, efeitos biológicos das radiações

ABSTRACT

After a first approach on the several possibilities of nuclear terrorism, and on the quantities and units used to measure ionizing radiation, we make a detailed description of the biological effects of ionizing radiation. Besides the possibility of the direct and indirect effects of radiation in biological means, we also describe the cellular effects, the different tissues radiosensitivity of the cells and tissues. The biological effects are described in detail, considering the several acute cellular syndromes, such as the effects in the hematopoietic system, effects in the gastrointestinal system, combined injury effects, delayed somatic effects and the genetic effects.

REV POR PNEUMOL 2004; X (SUPL 1): 91-103

Key-words: Nuclear terrorism, ionizing radiation, radiation biological effects.

Como todos constatamos, as ameaças terroristas são actualmente parte integrante de muitos noticiários. Apesar de todas as ameaças terroristas terem riscos importantes, um dos cenários mais dramáticos é o nuclear, que pode tomar variadas formas, desde o roubo e detonação de armas nucleares (nomeadamente a bomba atómica suja), passando por ataques a instalações nucleares. Estes diferentes tipos de possibilidades têm consequências muito diferentes.

A chamada **bomba suja** é uma bomba convencional que contém material radioactivo que se dispersará, sob a forma de aerossóis, quando a bomba é detonada. Não é, pois, uma arma nuclear, pelo que não envolve uma explosão nuclear. Este tipo de ameaça terrorista é bem real, porque não só há alguma facilidade em obter pequenas fontes de radiação como é de baixo custo.

De facto, a população em geral está exposta a inúmeras fontes de radiação, que na maior parte dos casos nem sequer suspeita. Alguns exemplos dizem respeito a fontes de cobalto-60 usadas para o tratamento de tumores, mas também para a irradiação de comida com o objectivo de matar microrganismos patogénicos, fontes de *cesium-137* usadas em equipamento médico e científico, fontes *americium-241* usadas em detectores de fumo e aparelhos para medirem o conteúdo de humidade do asfalto, fontes de *tritium* usadas em sinais de saída de emergência que brilham na escuridão, fontes de *iridium-192* usadas em máquinas que detectam fissuras no betão e nas soldaduras ou fontes de níquel-63 usadas para análise química. Quaisquer destas fontes podem ser facilmente roubadas e incorporadas na composição de bombas sujas.

Claro que a manipulação destas fontes, comporta riscos graves, que também têm que ser tidos em conta. Assim, se um indivíduo manipulasse uma barra não selada de cobalto-60 com cerca de 45 cm de comprimento, como as usadas para a esterilização de comida, receberia uma

dose letal, provocando morte dentro de algumas semanas se a exposição fosse de um minuto, ou morte imediata se a exposição fosse de 20 minutos. Dados os perigos inerentes à sua manipulação pouco cuidada, estas fontes devem estar protegidas.

O **ataque a instalações nucleares**, tais como reactores, pode levar a graves quebras de fornecimento de energia e, por conseguinte, tem grande impacto em termos económicos. Associadamente, um ataque deste tipo terá graves consequências em termos de Saúde Pública, porque seja uma explosão, fogo ou destruição interna, resulta sempre na saída descontrolada de material radioactivo. Porém, como este tipo de instalações estão localizadas normalmente em áreas restritas, um ataque a instalações deste tipo, em princípio, não causaria grande número de mortes imediatas nem exporiam grande número de pessoas a aumento de risco de virem a sofrer de cancro.

Finalmente, um **ataque com armas nucleares** pode ocorrer ou por produção de uma bomba atómica recorrendo a urânio enriquecido ou a plutónio, o que é improvável, ou por roubo de uma arma nuclear já produzida em países vulneráveis em termos de segurança. A utilização de uma arma deste tipo pode destruir completa ou parcialmente cidades, com subsequente enorme número de vítimas imediatas e a médio e longo prazo.

Muito de medo associado aos ataques nucleares, quaisquer que eles sejam, resultam do envolvimento de material radioactivo, que pode emitir vários tipos de radiação, com modos diferente de interacção com o organismo vivo.

Os materiais radioactivos são compostos por átomos instáveis. Um átomo é instável porque apresenta uma relação próton-neutrão pouco favorável. Todos os átomos instáveis tentam atingir a estabilidade, isto é, uma melhor relação entre o número de prótons e o número de neutrões. Os processos para atingir esta estabilidade nuclear são variados, mas todos implicam a emissão

por parte do núcleo de partículas e/ou radiação electromagnética. Estes processos constituem o decaimento radioactivo. Podemos então definir decaimento radioactivo como o processo de transformação nuclear através do qual um nuclídeo-pai instável dá origem a outro nuclídeo-filho instável ou não por emissão de partículas e/ou energia.

As emissões de radiação por parte do núcleo podem ser de partículas alfa (que correspondem a núcleos de hélio, isto é, dois protões e dois neutrões), beta (electrões negativos ou positivos) e radiação gama (radiação electromagnética - fotões).

UNIDADES DE MEDIDA DA RADIAÇÃO

Vários tipos de unidades e grandezas devem ser definidas quando falamos de actividade, exposição a radiações e efeitos biológicos consequentes a irradiações por emissões radioactivas.

A primeira grandeza que teremos de definir é a de **actividade ou velocidade de desintegração**, isto é, o número de átomos radioactivos que se desintegram na unidade de tempo. A unidade actualmente usada é o becquerel (Bq) que corresponde a uma desintegração por segundo. A unidade tradicional, e ainda em uso é o curie (Ci) que é o número de desintegrações por segundo que ocorrem num grama de rádio-226, o que corresponde a $3,7 \times 10^{10}$ desintegrações por segundo.

A **exposição ou dose-exposição** exprime a carga produzida por ionização por unidade de massa de ar. Este conceito aplica-se à radiação X ou gama. A unidade de dose-exposição é o coulomb por quilograma de ar, ou seja, a quantidade de raios-X ou gama que, actuando sobre 1 kg de ar, liberta por ionização primária e secundária iões que transportam a carga 1 coulomb. A dose-exposição foi inicialmente definida como a grandeza que exprime a capacidade de a radiação-X

e gama produzir iões no ar. A unidade adoptada foi o roentgen (R) que se define como a exposição produzida por raios X ou gama que liberta, por ionização primária e secundária, uma unidade cgs electrostática de carga quando atravessa 0,001293 g de ar (1 cm³ em condições PTN). Um c/kg corresponde a 3876 R.

Como os efeitos biológicos dependem da energia libertada nos tecidos, foi criada uma outra grandeza que exprime a energia absorvida no meio directa e independentemente do tipo de radiação, que é a **dose absorvida**. Como esta grandeza se aplica a qualquer tipo de radiação e qualquer tipo de material irradiado, permite ultrapassar as limitações da dose-exposição, pois esta só diz respeito às acções da radiação electromagnética no ar. A dose absorvida é então a energia cedida por unidade de massa do material. A unidade de dose absorvida é o *gray* (Gy) que corresponde a 1J/kg. Outra unidade de dose absorvida, ainda utilizada, é o rad (*Radiation Absorbed Dose*) que equivale à libertação de 100 erg por grama de material irradiado. Desta modo 1 Gy equivale a 100 rad.

O estudo das consequências das irradiações a sistemas biológicos permitiram verificar que iguais doses absorvidas podiam desencadear diferentes efeitos radioquímicos e radiobiológicos consoante o tecido ou órgão, o tipo de radiação utilizado e as condições de irradiação. Para contabilizar estes efeitos houve necessidade de se introduzirem factores de modificação, o que levou à definição do **equivalente de dose**. O factor de qualidade (Q) é um factor de modificação utilizado para obter o equivalente dose a partir da dose absorvida e que foi inicialmente chamado eficiência biológica relativa (RBE).

Um equivalente de dose de qualquer tipo de radiação produz, num dado tecido, o mesmo efeito biológico que o mesmo equivalente de dose de raios X de 200 keV. O efeito biológico para um dado equivalente de dose é constante, qualquer que seja a radiação utilizada. A unidade

de equivalente de dose é o sievert (Sv). Um Sv de qualquer radiação produz o mesmo efeito biológico, que por sua vez é o mesmo que 1 Gy da radiação padrão de raios-X de 200 keV. No caso das partículas alfa, o factor de qualidade Q é 10, enquanto para as beta é de 1. Uma outra unidade de equivalente de dose, usada antigamente, é o rem (*Rad Equivalent Man*). O equivalente de dose de 1 rem de qualquer radiação produz o mesmo efeito biológico que 1 rad de raios-X de 200 keV.

A definição de equivalente de dose foi generalizada para qualquer tipo de radiação a irradiar um órgão ou tecido, levando à definição de uma outra grandeza chamada **dose equivalente**. A dose equivalente num órgão é a soma das doses absorvidas num órgão ou tecido multiplicadas pelos factores de ponderação das diferentes radiações. A dose equivalente de 1 Sv corresponde a 100 rem.

Relacionada com a dose equivalente, temos a **dose letal** (LD_{50}), que se define como a dose aguda de radiação fatal para 50% da população exposta e que corresponde a 500 rem. Doses de radiação superiores a 100 rem produzem lesão do ADN.

EFEITOS DA RADIAÇÃO

Quando um feixe de radiações ionizantes interage com um sistema biológico, o primeiro efeito da acção das radiações resulta da transferência da sua energia aos componentes celulares fundamentais, com produção de pares de iões à medida que atravessam a matéria. Esta transferência de energia varia com o tipo de radiação em causa. As radiações electromagnéticas, como os raios X e os raios gama, são muito penetrantes, pelo que têm longos percursos antes de libertarem toda a sua energia, enquanto que as radiações particuladas, como as alfa e as beta, não sendo tão penetrantes, têm trajectos mais reduzidos.

A Transferência Linear de Energia (LET - *Linear Energy Transfer*) define a quantidade de energia que uma radiação deposita por unidade de comprimento de percurso. A radiação com um grande percurso, como os raios-X, os raios gama e partículas beta de alta energia tem geralmente reduzida LET, enquanto a radiação com pequeno percurso, como as partículas alfa, os protões e os neutrões têm uma LET alta. Quando durante o percurso, a radiação ionizante interage com as células, deposita aí sua energia. O efeito biológico que vai produzir dependerá da quantidade de energia transferida, o que significa que é função do LET.

A radiação, ao interagir com as células, pode lesá-las com maior ou menor gravidade ou pode mesmo provocar a sua morte. Este tipo de acções pode ocorrer por dois mecanismos diferentes: a acção directa e a acção indirecta.

a) Acção directa

A acção directa das radiações refere-se à interacção directa com um constituinte crítico celular. Como consequência da interacção, os átomos do alvo podem ser ionizados ou excitados, o que inicia uma sequência de acontecimentos que terminam em alterações biológicas.

No caso de uma irradiação aguda de corpo inteiro, a $LD_{50/60}^1$ em humanos é de cerca de 4 Gy (400 rad).

Assumindo que são necessários cerca de 34 eV para produzir um par de iões e que 1 Sv de radiação de baixo LET representa uma absorção de energia de 1J/kg, ou seja, $6,25 \times 10^{18}$ eV/g, então a dose letal média produz aproximadamente $7,35 \times 10^{17}$ pares de iões por cada grama de tecido.

Em tecidos moles, esta dose representa a ionização de somente 1 em 10 000 000 de átomos.

A acção directa da radiação é o processo dominante com radiação de alto LET (partículas alfa, neutrões e protões) porque o rasto da ionização é muito denso.

Adicionalmente, a acção directa está associada

com efeitos de radiação para os quais se admite uma dose sem limiar (limiar zero), isto é, podem ocorrer efeitos genéticos.

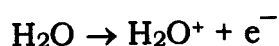
Neste cenário, a lesão pode ser transmitida a sucessivas gerações de células, o que torna a lesão cumulativa com a dose de radiação.

b) Acção indirecta

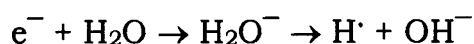
A absorção de energia após a interacção pode produzir radicais livres a partir da água ou do oxigénio, que por sua vez vão actuar sobre as estruturas celulares. Um radical livre é um átomo livre ou uma molécula que transporta um electrão orbital não emparelhado na camada mais externa. Um átomo com um electrão não emparelhado na camada mais exterior geralmente apresenta um alto grau de reactividade química.

A água é o constituinte principal dos organismos vivos, pelo que tem especial interesse a interacção da radiação ionizante com ela, com formação de radicais livres, processo conhecido como radiólise da água.

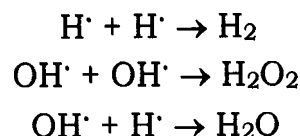
Neste processo, a água, ao sofrer interacção, ioniza-se, originando iões cuja recombinação é muito improvável



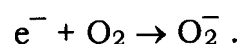
Estes iões vão antes originar novas reacções, tais como



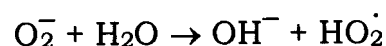
Os radicais OH^\bullet e H^\bullet são extremamente reactivos, pelo que podem reagir entre si ou desencadear reacções de oxidação-redução com outras moléculas do meio, com formação de outras moléculas igualmente muito agressivas em termos de reactividade química



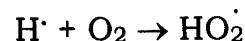
Para além das moléculas de água, tem também especial interesse a presença de oxigénio dissolvido na água e nos tecidos. O electrão livre, formado na radiólise da água, pode reagir com a molécula de oxigénio, originando



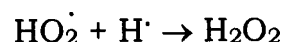
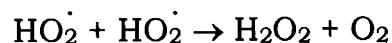
Esta molécula de oxigénio com um electrão desemparelhado pode reagir com moléculas de água, formando novos radicais muito reactivos.



Pode ainda ocorrer reacção entre o radical H^\bullet com a molécula de O_2 , originando



que por sua vez reagem com outro HO_2^\bullet ou com um H^\bullet com formação adicional de mais radicais quimicamente reactivos.



Todos estes diferentes radicais livres podem agir como agentes oxidantes ou redutores ou então formar peróxidos quando reagem com a água, que por sua vez podem inactivar mecanismos celulares ou então interagir com o material genético da célula.

LESÕES MOLECULARES POR RADIAÇÕES

As lesões provocadas pela acção das radiações são bastante complexas, pelo que os processos

subjacentes são frequentemente considerados como ocorrendo em 4 estádios sequenciais: o estadio físico inicial, o estadio físico-químico, o estadio químico e o estadio biológico. No estadio físico inicial, ocorre a interacção da radiação com a respectiva cedência de energia à célula, causando ionização. Este estadio é muito curto, durando somente uma fracção de segundo ($\sim 10^{-16}$ seg). No estadio físico-químico, os iões formados interagem com as moléculas de água, o que leva à produção de peróxido de hidrogénio (H_2O_2) e de radicais livres quimicamente reactivos, tais como H^+ , OH^- , H^\bullet e OH^\bullet . Este estadio tem uma duração de cerca de 10^{-6} seg. No estadio químico, os produtos de reacção originados no estadio anterior interagem com as moléculas orgânicas da célula. Tanto os radicais livres como os agentes oxidantes podem reagir quimicamente com as moléculas que formam os cromossomas, atacar directamente uma molécula ou promover ligações nas longas moléculas partidas. Este estadio tem uma duração mais longa, que pode atingir alguns segundos. Finalmente, no estadio biológico verificam-se alterações que podem afectar uma célula numa grande variedade de locais com consequências diferentes. Este estadio é o mais longo, podendo durar dezenas de minutos a dezenas de anos, dependendo dos sistemas em causa.

EFEITOS CELULARES

Quando um indivíduo é irradiado por radiação ionizante, esta pode ou não interagir com um conjunto maior ou menor de células do organismo. Se não ocorreu interacção, significa que a radiação não cedeu energia, ou seja, não há produção de qualquer lesão. Se as células forem directamente atingidas, e a cedência energética suficientemente grande, as células podem ser lesadas ou mesmo mortas. As lesões mais graves, porque se repercutem na geração celular seguinte, são as que se traduzem por defeitos nas estruturas

reprodutivas celulares, como os cromossomas ou os seus componentes, isto é, o ADN, os genes, ou alguns nucleósidos específicos.

Estas lesões, ao contrário da morte celular, podem traduzir-se clinicamente como a síndrome do mal-estar às radiações, cataratas ou, a longo termo, aparecimento de neoplasias.

Tendo em conta estas acções, os efeitos biológicos das radiações podem pois dividir-se em 2 classes: os efeitos somáticos e os efeitos hereditários. Os efeitos somáticos aparecem nas células atingidas e só ocorrem em pessoas irradiadas. Os efeitos hereditários ou genéticos resultam das lesões em células reprodutivas, de onde resulta a passagem da lesão da pessoa irradiada para as gerações seguintes.

RADIOSENSIBILIDADE DAS CÉLULAS E DOS ÓRGÃOS

As diferentes células e tecidos biológicos apresentam sensibilidade diferente à acção das radiações. As leis que explicam estas diferenças são as leis de Bergonie e Tribondeau, que dizem que as células mais radiosensíveis são as que se dividem mais rapidamente, as que têm maior futuro cariocinético² e as mais indiferenciadas³. Dentro destas definições incluem-se as células sanguíneas imaturas, as células da cristas intestinais, as células fetais, etc. Tendo igualmente por base as mesmas leis, podemos dizer que os músculos e as células nervosas são relativamente insensíveis às acções da radiação.

Lesões significativas das células mais radiosensíveis manifestam-se muitas vezes por sintomas clínicos, como diminuição de todas as linhas de células sanguíneas, mal-estar das radiações, defeitos de radiação e, a longo prazo, aumento do risco de aparecimento de neoplasias..

Adicionalmente, a presença de oxigénio aumenta a sensibilidade à radiação, uma vez que a interacção das radiações com as moléculas de

oxigénio leva à produção de peróxido de hidrogénio e radicais livres quimicamente activos.

A SÍNDROMA DE IRRADIAÇÃO AGUDA

Em termos gerais, só podemos falar de efeitos nocivos das radiações quando as doses de radiação ionizante são recebidas num período de tempo restrito, isto é, quando estamos em presença de uma exposição aguda a radiações.

Estes efeitos nocivos variam de acordo com a intensidade da irradiação. Após uma exposição aguda de corpo inteiro inferior a 0,25 Gy (25 rad), não se verificam efeitos clinicamente detectáveis. Estes só se começam a verificar para exposições de corpo inteiro iguais ou superiores a 0,5 Gy (50 rad). Com este tipo de irradiação aguda, aparecem lesões sanguíneas ligeiras que se tornam mais evidentes para exposições de corpo inteiro de 1 Gy (100 rad). Para exposições agudas de corpo inteiro superiores a 2 Gy (200 rad) verificam-se já lesões num número suficiente de células radiosensíveis capazes de produzir mal-estar das radiações, pouco tempo após a exposição, isto é, de alguns dias a algumas semanas. Só após uma exposição aguda de corpo inteiro de 4 Gy (400 rad) é que aparecem efeitos somáticos imediatos, que incluem alterações sanguíneas, náuseas, vómitos, epilação, diarreia, tonturas, alterações nervosas, hemorragias, e até morte. Sem cuidados médicos, cerca de metade das pessoas expostas morrem durante um período de 60 dias ($LD_{50/60}$). Se a exposição aguda de corpo inteiro for igual ou superior a 7 Gy (700 rad), nenhuma pessoa sobreviverá (LD_{100}), independentemente do tratamento prescrito às pessoas expostas.

Os sobreviventes das irradiações agudas de corpo inteiro, para além dos efeitos agudos, podem igualmente desenvolver vários efeitos somáticos tardios como a epilação [ocorre para exposições de 5 Gy (500 rad)], aparecimento de cataratas [necessita de doses superiores a 2 Gy

(200 rad), sobretudo de neutrões], eritema [surge quando há uma exposição única de 6 a 8 Gy (600 a 800 rad)], esterilidade e/ou aparecimento de tumores malignos. Em relação à esterilidade, esta é dependente da dose e variável consoante o sexo. Em termos gerais, para a esterilidade ser permanente são necessárias doses superiores a 4 Gy (400 rad) nas células reprodutivas. Contudo, no sexo masculino, mesmo para estas doses a esterilidade pode ser temporária. No sexo feminino, quando ocorre, é em geral permanente.

A SÍNDROMA HEMATOPOIÉTICA

As células estaminais hematopoiéticas são os tecidos mais radiosensíveis do organismo. Doses de radiação iguais ou superiores a 2 Gy (200 rad) podem levar à perda significativa da capacidade de a medula óssea produzir células sanguíneas. Doses agudas de radiação matam algumas células estaminais mitoticamente activas, com a consequente diminuição das três séries sanguíneas circulantes: vermelha, branca e plaquetar. Depois de morrerem as células maduras circulantes, como não são repostas, aparecerá pancitopenia.

Assim, a sintomatologia associada à lesão da medula óssea inclui anemia, aumento da susceptibilidade às infecções e diminuição da imunidade, e hemorragia, sendo a infecção uma das principais causas de morte após uma irradiação de corpo inteiro.

A síndrome hematopoiética inicia-se cerca de 8 a 10 dias após uma exposição a doses inferiores aos 7 Gy (700 rad), com uma redução acentuada do granulócitos e plaquetas. Em simultâneo, surgem petéquias e púrpura, podendo também ocorrer hemorragias descontroladas, com a consequente anemia. A pancitopenia aparece cerca de 3-4 semanas depois, sendo total para doses superiores a 5 Gy (500 rad). Devido às infecções bacterianas e mitóticas oportunistas, pode haver febre, taquicardia e taquipneia, podendo as

infecções tornar-se descontroladas devido à cada vez menor produção de anticorpos.

A síndrome hematopoiética é reversível se após a irradiação ficarem íntegras pelo menos 10% das células estaminais. Caso contrário, ocorrerá a morte cerca de 6 semanas após a irradiação.

A SÍNDROMA GASTROINTESTINAL

As células de revestimento de todo o tubo digestivo, nomeadamente as do intestino delgado, são muito radiosensíveis, pois como têm uma vida curta precisam de ser substituídas muito rapidamente, isto é, têm uma grande actividade mitótica.

Exposições acima dos 7 Gy (700 rad) conduzem à depleção das células das cristas intestinais em alguns dias, com posterior ruptura e ulcerações da mucosa. À medida que a mucosa fica lesada, há invasão bacteriana, com consequente bacteriemia, para a qual não há resposta por causa da simultânea redução do número de granulócitos, como resultado da síndrome hematopoiética.

Para exposições acima dos 12,5 Gy (1 250 rad), a morte surge em alguns dias, devido às alterações electrolíticas e à desidratação, consequentes às perdas através das extensas ulcerações mucosas.

EFEITOS COMBINADOS

Quando falamos nos efeitos agudos das radiações no contexto do terrorismo, não podemos deixar de nos referir às lesões combinadas, que são lesões por irradiação que se associam a outro tipo de lesões.

Estas lesões combinadas são muito mais graves, como demonstram experiências realizadas em ratos, onde dois tipos de lesões subletais ou minimamente letais quando consideradas individualmente podem, se actuarem em simultâneo, aumentar a mortalidade.

EFEITOS SOMÁTICOS TARDIOS

Os efeitos imediatos ou agudos da acção das radiações resultam na maior parte dos casos da morte de células de alguma população particular.

Contrariamente, os efeitos tardios devem-se a lesões das células sobreviventes mas que ficaram com alguma lesão consequente à interacção da irradiação, lesão essa que vai ser passada à geração celular seguinte. Se as células lesadas forem germinativas, a lesão pode ter como consequência uma mutação genética que se vai expressar na geração seguinte. Se as células lesadas forem somáticas, a consequência pode ser uma leucemia ou um tumor sólido.

Tanto os efeitos genéticos ou hereditários como o cancro são efeitos estocásticos, ou seja, são efeitos sem limiar, pois podem aparecer a partir de uma lesão de algumas, poucas, células ou mesmo de uma única célula. Um efeito estocástico é, pois, um efeito do tipo tudo-ou-nada, isto é, quando se aumenta a dose de radiação aumenta-se apenas a frequência do efeito e não a gravidade do mesmo.

Os efeitos não estocásticos são efeitos somáticos cuja gravidade aumenta em função do aumento da dose de radiação, pois a gravidade está relacionada com o número de células e tecidos atingidos. Desta maneira, podemos considerar a existência de um limiar abaixo do qual não se verificam efeitos. São exemplos as cataratas ou a síndrome aguda das radiações. Normalmente, são necessárias doses de radiação maiores para causar um efeito não estocástico significativo ou para lesar seriamente a saúde do que para aumentar os riscos de aparecimento de neoplasias ou de mutações.

Devemos contudo ter em conta que contabilizar o risco de aparecimento de neoplasias é muito difícil, porque existe um período de latência longo e variável (entre 5 a 30 anos) entre o momento da exposição e o aparecimento das mani-

festações clínicas, porque um cancro induzido por radiação não se distingue dos cancros que ocorrem espontaneamente, porque os efeitos variam de pessoa para pessoa e porque a incidência normal de cancro é relativamente alta (cerca de 20%, isto é, 1 em cada 5 pessoas).

Como estimativa, pensemos que uma única exposição de 1 rem pode provocar um aumento das alterações de cancros em cerca de 2-4 pessoas em 10 000.

EFEITOS GENÉTICOS

Os efeitos genéticos devidos à exposição a radiações podem resultar das lesões dos cromossomas lesados quando as células reprodutoras são expostas. Estes efeitos podem repercutir-se nos filhos e nas gerações futuras dos indivíduos expostos e manifestar-se como mutações genéticas ou defeitos de nascimento.

Para os efeitos genéticos devemos ter em linha de conta que uma exposição de 1 rem pode provocar um aumento de alterações por defeitos genéticos de 5-75 casos por 1 000 000 de pessoas expostas.

Pensa-se que a lesão do material genético celular, particularmente do ADN, é a causa mais importante de lesões por efeitos da radiação, levando à morte celular e a mutações que podem terminar em neoplasias. Os ácidos nucleicos, que usam átomos de hidrogénio, carbono, fósforo e enxofre, têm extrema importância, não só porque podem incorporar nuclídeos radioactivos como ^3H , ^{14}C , ^{32}P , ^{33}P , ^{35}S e ^{125}I no núcleo celular, mas também porque a radiação emitida vai ser primariamente absorvida dentro da célula, aumentando, desta maneira, a possibilidade de provocar lesão.

O DANO PROVOCADO POR ATAQUES TERRORISTAS

As consequência das acções terroristas e, por conseguinte, o nível do dano, são muito variáveis, pois dependem do tipo de ocorrência, isto é, dependem de a acção ser a explosão de uma bomba nuclear, uma explosão de uma bomba suja ou um ataque a instalações nucleares.

O pior cenário do terrorismo nuclear é, sem dúvida, a possibilidade de utilização de **armas nucleares**. A energia libertada por uma explosão nuclear altera o ambiente de diferentes maneiras. Na região próxima da detonação, os efeitos directos principais são devidos à onda de choque e à onda de calor que acompanham a explosão. A onda de choque pode destruir ou danificar edifícios, dispersar detritos e destruir árvores. A onda de calor pode incendiar materiais combustíveis e, consequentemente, provocar muitos incêndios. A intensidade destes efeitos depende do local da explosão, isto é, se a explosão ocorre no solo ou na atmosfera.

Nas armas nucleares, o que provoca maiores danos é o seu poder explosivo e não a emissão radioactiva. Conhecimentos baseados nas explosões nucleares de Hiroxima e Nagasáqui, onde morreram 100 000 pessoas em cada cidade, revelaram que a maioria das vítimas resultou das explosões e do fogo. A emissão radioactiva foi um factor aditivo, mas esteve longe de ser a principal causa de morte. As bombas de Hiroxima e Nagasáqui foram detonadas na atmosfera para maximizar o dano global, mas esse facto também reduziu muito as poeiras radioactivas.

Contrariamente, se a arma nuclear for detonada no solo, tanto a área destruída como as vítimas seriam provavelmente menores, mas aumentaria a dispersão de partículas de solo, já radioactivas, por centenas de quilómetros. Nesta situação, haveria possibilidade de sobreviverem mais pessoas a curto prazo, especialmente se houver planos de evacuação adequados ou uma

rede conveniente e eficaz de abrigos.

Relativamente às **bombas sujas**, como já foi referido, não são armas nucleares, mas antes bombas convencionais que contêm material radioactivo, tendo pois só uma fracção da sua força explosiva. O dano provocado por um dispositivo de dispersão de radioactividade seria significativamente menor do que o de uma explosão nuclear, mas causaria vítimas e contaminaria a área próxima da explosão. Da mesma maneira que com um explosivo convencional, ouvir-se-ia a explosão e poderiam ser mortas algumas pessoas pela própria explosão, mas não se saberia que era uma bomba suja até que as autoridades o anunciassem.

Quanto ao conteúdo em material radioactivo, as bombas sujas contêm muito menor quantidade do que as bombas nucleares. Estas geram novos núcleos radioactivos durante o processo da explosão, enquanto nas bombas sujas os materiais radioactivos são colocados na bomba e a quantidade que se pode colocar, sem matar as pessoas que o fazem, depende de vários factores, desde o tipo de material radioactivo, da maneira como é manipulado e como são usadas as protecções. Devemos ter sempre em linha de conta que, como os materiais que potencialmente causam mais danos são também os mais letais, os próprios terroristas têm grande probabilidade de ficarem doentes ou até serem mortos.

No caso das bombas sujas, para além das vítimas causadas pela própria explosão, são improváveis vítimas imediatas devido a radiação, mas podem aumentar os riscos de saúde a médio e a longo prazo. Este aumento dependerá do material radioactivo usado, do tamanho do engenho, das condições climáticas, nomeadamente do vento e da eficácia da resposta. A maioria das pessoas fora da área de explosão não absorveria radiação suficiente para causar a síndrome do mal-estar às radiações e os indivíduos que ficassem expostos provavelmente recuperaram.

Ainda assim, as bombas sujas causariam

problemas graves. Alguns deles seriam o resultado do medo. O impacto psicológico de espalhar radioactividade, quaisquer que fossem os danos provocados, é de difícil estimativa. A população em geral, assim como os edifícios e o solo onde a explosão aconteceu, teriam que ser descontaminados. Se há muitos detritos radioactivos, uma área mais extensa tem que ser descontaminada por causa da dispersão pelo vento. Em termos gerais, uma descontaminação correcta e eficiente é possível, mas é muito demorada e extremamente dispendiosa.

O ataque directo a **reactores nucleares** ou outras instalações nucleares, como instalações de enriquecimento, armazenamento e de reprocessamento do combustível nuclear usado ou ainda dos meios de transporte entre eles, são outros possíveis alvos das acções terroristas. O pior pesadelo para muitos é um avião em rota de colisão com um reactor nuclear ou uma estação de reprocessamento de combustível usado, causando uma explosão do tipo de Chernobyl. Outras ameaças incluem comandos terroristas que têm acesso a um reactor e o sabotam a partir do interior. Esta é também uma preocupação a ter em conta, apesar de o dano associado com este tipo de ataque ser de longe menos grave do que o de uma explosão nuclear numa cidade. Os governos têm tomado algumas medidas considerando este cenário, associadas com os aviões que são agora muito mais controlados. Adicionalmente, a grande maioria dos reactores está metida dentro de uma cápsula constituída por várias camadas de betão de grande espessura e resistência, projectada para um embate de uma pequena aeronave, porém não suficiente para resistir à colisão de um grande avião moderno. Actualmente todos os reactores têm sistemas para arrefecimento de emergência projectados para funcionarem mesmo no caso de cortes de energia eléctrica, o que reduz em muito o risco de o núcleo central radioactivo derreter e espalhar radioactividade. É provável que os sensores de terremotos, obrigatórios em todos os reactores, activariam

paralisação automática do mesmo, para proteger o núcleo.

Outros possíveis locais de embate de aeronaves, como as instalações de reprocessamento de combustível usado, não estão tão bem protegidas. Porém, o seu atingimento é mais difícil porque são alvos com pouco altura. Por outro lado, este tipo de material é muito menos radioactivo de que o núcleo do reactor. Contudo, uma explosão numa instalação de reprocessamento de combustível usado poderia dispersar quantidades apreciáveis de radiação, embora menor do que num ataque a um reactor. Adicionalmente, a libertação de radioactividade seria provavelmente mais lenta, o que daria tempo à evacuação das pessoas à volta da área atingida.

O risco para a Saúde Pública de um grande ataque a instalações nucleares resultaria da dispersão de material radioactivo e da consequente exposição a radiação e dependeria da quantidade libertada, da direcção e da velocidade do vento e das condições atmosféricas. Supondo que se deu uma libertação radioactiva, os níveis de radiação devem ser monitorizados pelas autoridades oficiais.

Em qualquer dos três cenários referidos, há ainda a considerar a possibilidade de haver contaminação dos níveis freáticos e dos campos agrícolas, com a consequente entrada de material radioactivo na cadeia alimentar e posterior irradiação interna das populações atingidas.

O QUE FAZER EM CASO DE ATAQUE?

Uma das características especiais dos materiais radioactivos é que podem ser detectadas actividades muito reduzidas. Por isso, em termos de detecção, o tamanho da amostra tem pouca importância, pelo que é fácil as pessoas podem saber se foram ou não contaminados com radiação. No caso de um ataque, os profissionais de Saúde sabem reconhecer os níveis considerados

prejudiciais e que requerem atenção médica.

Cada um dos cenários descritos necessita de uma resposta diferente por parte das entidades governamentais, devendo contudo ser fornecida informação apropriada e precisa em relação às medidas de aconselhamento para a população através do rádio e da televisão.

No caso de um **ataque com bomba suja**, deve-se ir ou permanecer em casa e estar atento às indicações difundidas pela rádio e televisão e, se possível, seguir para a rede de abrigos, se existirem. Caso existam, devem ter ventoinhas extratoras de ar, ar condicionado e unidades de calor com ar forçado. Estes sistemas só devem ser usados para fazer recircular o ar que já existia no edifício. Se a pessoa for apanhada na rua deve entrar o mais rapidamente possível dentro de um edifício, para diminuir a exposição às poeiras radioactivas. Se estiver suficientemente perto da explosão, de tal modo que ficou coberta com resíduos radioactivos, a pessoa em questão não se deve afastar do local onde se encontra, para ser descontaminada, pois as primeiras pessoas a serem descontaminadas são as que estão mais próximas do local da explosão e, só mais tarde, as mais afastadas. Mesmo que as autoridades demorem a responder, é mais provável receber tratamento conveniente no local pela equipa de socorro do que noutra local. Um outro ponto importante é ser capaz de identificar a fonte da radiação, assim como a direcção do vento, e manter a máxima distância possível até à fonte e tentar ficar do lado oposto ao vento. Em relação às bombas sujas, deve sempre ter-se em mente de que se estiver suficientemente longe para sobreviver à explosão inicial, a quantidade de radiação será provavelmente tão baixa que alguns horas de exposição não serão suficientes para provocar dano.

Se o indivíduo tiver ficado coberto com detritos radioactivos, também não se deve afastar, pelo que não deve entrar no automóvel, não deve entrar em transportes colectivos, nem deve ir para

casa, pois pode contaminar o automóvel, outras pessoas e a família. Também devem ser implementados controlos de tráfico para permitir aos veículos de emergência a chegada rápida à cena do bombardeamento.

O pó radioactivo deve ser lavado da pele com água, e a roupa potencialmente contaminada deve ser colocada em sacos de plástico, que serão depois de selados, colocados identificados numa área separada. Estes sacos devem ser enviados para as autoridades oficiais para conveniente destruição. Os indivíduos apanhados fora de casa e potencialmente expostos ao pó da explosão, devem tirar os sapatos e as roupas exteriores fora de casa. Além disso, devem tomar um banho de chuveiro antes de ir para dentro de casa, para reduzir o risco de contaminação da habitação.

Relativamente às **instalações nucleares**, deve ter-se sempre em conta que todas as pessoas que vivem perto devem, por lei, ser aconselhadas a como proceder em caso de uma emergência nuclear, pelo menos uma vez por ano. Tanto a administração central como a local devem ter planos para estabelecer uma área de exclusão absoluta com um raio de 15 km a partir da instalação e uma área de exclusão de ingestão de alimentos com um raio de 80 km a partir da instalação. Os planos também devem considerar estradas de evacuação, locais de recepção para quem precisar de monitorização e centros para alojamento temporário.

Deve igualmente estar previsto um sistema de alerta e notificação que deve rapidamente informar a população de qualquer ameaça potencial tanto natural como accidental. Este sistema deve usar sirenes, alerta rádio, alertas de estrada ou combinação de alertas para informar a população de que deve sintonizar as estações de rádio ou de televisão, as quais devem fornecer informações e instruções de emergência. Deve estar igualmente previsto a necessidade de ajudar as pessoas doentes ou incapazes de se deslocarem.

Nos casos mais graves de emergências em

instalações nucleares, são recomendadas evacuações baseadas na localização geográfica da instalação em causa, em vez de se esperar que a situação se deteriore e ocorra a libertação de material radioactivo.

No caso de um terrorista ser capaz de detonar uma **arma nuclear**, pouco pode ser feito para proteger quem está próximo do local da explosão. Contudo, se apesar de suficientemente longe, nos apercebermos de que ocorreu uma explosão nuclear, devemos imediatamente baixarmo-nos e cobrimo-nos. Esta simples medida é a melhor para evitar a radiação inicial e a onda de calor gerada pela explosão, pois podem causar, nomeadamente às pessoas que andam na rua, queimaduras muito graves. Além disso, deve evitar-se olhar para a explosão (cogumelo), pois a luz desenvolvida pode lesar permanentemente a retina.

Uma vez terminada a explosão e desaparecida a luz, deve-se permanecer debaixo de cobertura, porque o intenso calor desenvolvido pela explosão produz uma onda de choque. Esta onda de choque pode deslocar-se extremamente rápido (6400 km/h) e provocar tanto ou mais dano que a explosão inicial, em especial em áreas muito povoadas. A probabilidade de sobreviver a esta onda de choque aumenta com a permanência junto ao chão. A onda de choque é seguida de ventos fortes, como resultado do vazio criado à medida que a onda de choque se desloca rapidamente para cima. A seguir a esta primeira fase, deve-se procurar um abrigo, porque o material sugado pela explosão e que gera o cogumelo vai começar a cair, contaminando tudo.

BIBLIOGRAFIA

1. CENTER FOR INTERNATIONAL SECURITY AND COOPERATION, Institute for International Studies, Stanford University, USA, 2003. <http://cisac.stanford.edu/nuclearterrorism/index.html>.
2. KIEFER J. Biological radiation effects, 1990. Springer-Verlag, Berlin.

BIOTERRORISMO. ETIOPATOGENIA DA AGRESSÃO
POR RADIAÇÕES/MARIA FILOMENA BOTELHO

3. MOSSMAN KL. Radiation effects in nuclear medicine. In: Textbook of nuclear medicine; volume 1:Basic science. Eds. Harbert J, Rocha, 2nd edition 1984, Lea and Febiger, Philadelphia, pp.283-302.
4. PEDROSO DE LIMA JJ. Biofísica médica. Imprensa da Universidade de Coimbra, 2003.
5. PEDROSO DE LIMA JJ. Física dos métodos de imagem com raios X. Edição ASA, SA. 1995.
6. RADIATION SAFETY FOR RADIATION WORKERS. 2003 Edition. The University of Wisconsin-Madison. <http://www2.fpm.wis.edu/safety/Radiation>.